

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR



FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN REDES DE COMUNICACIÓN

INFORME FINAL CASO DE ESTUDIO PARA UNIDAD DE TITULACIÓN
ESPECIAL

TEMA:

“EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11N, EN UN
AMBIENTE DE LABORATORIO. CASO DE ESTUDIO ESPE”

María Antonella Vallejo Baldeón

Quito – 2016

AUTORÍA

Yo, María Antonella Vallejo Baldeón, portador de la cédula de ciudadanía No.1711761120, declaro bajo juramento que la presente investigación es de total responsabilidad del autor, y que se he respetado las diferentes fuentes de información realizando las citas correspondientes. Esta investigación no contiene plagio alguno y es resultado de un trabajo serio desarrollado en su totalidad por mi persona.

María Antonella Vallejo Baldeón

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	5
2	JUSTIFICACIÓN	6
3	ANTECEDENTES	6
4	OBJETIVOS.....	8
4.1	Objetivo General	8
4.2	Objetivos Específicos	8
5	DESARROLLO CASO DE ESTUDIO.....	9
5.1	ESTÁNDAR IEEE 802.11N	9
5.1.1	Principales características del estándar IEEE 802.11n.....	9
5.1.1.1	Tecnología MIMO	10
5.1.1.2	Modulación OFDM.....	10
5.1.1.3	Tasas de transferencia	10
5.1.1.4	Frecuencia de operación.....	11
5.1.1.5	Ancho de Canal	12
5.1.1.6	Agregación de Tramas	12
5.2	INTERFERENCIAS	13
5.2.1	Interferencia Co-canal	13
5.2.2	Interferencia de canal adyacente	13
5.3	MÉTRICAS DE DESEMPEÑO	15
5.3.1	Retardo End-to-End [ms]	15
5.3.1.1	Protocolo NTP	16
5.3.2	Variación de Retardo (Jitter) [ms]	16
5.3.3	Pérdida de Paquetes (Packet Loss) [%].....	17
5.3.4	Rendimiento (Throughput) [bps].....	17
5.4	ESTADO DEL ARTE DEL DESEMPEÑO DE REDES INALÁMBRICAS BASADAS EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11N	19
5.5	METODOLOGÍA.....	22
5.5.1	Materiales.....	22
5.5.2	Escenarios de prueba	24
5.5.3	Métodos	25
5.5.3.1	Asignación de canales.....	25
5.5.3.2	Configuraciones	26
5.5.4	Técnica intrusiva de inyección de tráfico	27
5.5.4.1	Configuración de la GUI de D-ITG	28
5.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE MEDICIONES	31
5.6.1	Resultados	31
5.6.1.1	Throughput normalizado(n)	31
5.6.2	Comparativa de resultados entre escenarios.....	33
5.6.2.1	Rendimiento (Throughput normalizado)	33
5.6.2.2	Retardo	35
5.6.2.3	Jitter	36

5.6.2.4	Pérdida de paquetes.....	37
5.6.3	Análisis y discusión de resultados	39
5.6.4	Análisis propuesta de mejora	41
5.6.5	Análisis técnico de Factibilidad.....	42
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	45
	Bibliografía	48
	Anexos:.....	51

1 INTRODUCCIÓN

El presente caso de estudio tiene el propósito de entregar un análisis del desempeño del estándar IEEE 802.11n, que permita tener una alternativa de mejora de la red de comunicaciones inalámbrica, con tecnología WiFi en concordancia con el estándar IEEE 802.11b/g, instalada en el campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Para conseguir dicho propósito se empieza con una revisión sistemática de las características referentes al estándar IEEE 802.11n, que permita realizar el estudio del estado del arte referente al análisis de desempeño de las redes inalámbricas basadas en dicho estándar. Este estudio tiene la finalidad de analizar el comportamiento de los parámetros de Calidad de Servicio (QoS del inglés *Quality of Service*) en el estándar IEEE 802.11n bajo dos escenarios de prueba mediana y completamente interferidos. Ambos casos dentro de un ambiente de laboratorio.

El informe se encuentra estructurado de la siguiente manera: La primera parte incluye aspectos teóricos ligados a la investigación, que son sustento para el caso de estudio. Aquí se identifican las principales características del estándar IEEE 802.11n y las métricas de desempeño a ser analizadas como *throughput* normalizado, retardo, *jitter* y paquetes perdidos. También se incluye el estado del arte del desempeño de las redes inalámbricas basadas en el estándar IEEE 802.11n que permitirá tener una comparación con los datos obtenidos en los dos escenarios de prueba mencionados.

La siguiente parte del informe detalla la metodología aplicada, la naturaleza de la investigación y las diferentes fases de la misma, con el fin de reunir todos los parámetros necesarios para el análisis de resultados. En este punto se realiza la toma de mediciones bajo dos escenarios de prueba. En el escenario completamente interferido, en el que se recrea la interferencia co-canal, se utilizará el canal 1 del estándar, configurado en tres APs, cada uno representa un red diferente, en los cuales se usará la técnica intrusiva de inyección de tráfico mediante el software D-ITG para obtener las mediciones requeridas. Este procedimiento se repetirá para los canales 6 y 11. En el escenario medianamente interferido, se trabajará con los canales 1, 6 y 11 (canales independientes entre sí que se encuentran no solapados) y se realizará el mismo procedimiento que se hizo con el escenario anterior.

En cuanto a la parte de resultados, se procede a realizar un análisis en términos de *throughput* normalizado, retardo, *jitter* y paquetes perdidos, del estándar IEEE 802.11n en los dos escenarios de prueba, permitiendo conocer el desempeño real del mismo.

Finalmente se presentarán las conclusiones y recomendaciones finales donde se resumen los resultados obtenidos.

2 JUSTIFICACIÓN

La importancia del desarrollo de este caso de estudio radica en tener una alternativa de cambio tecnológico que mejore el rendimiento de la red actual de comunicaciones inalámbrica instalada en el campus universitario de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la cual, por tratarse de una entidad pública Categorizada clase A, deberá garantizar un adecuado servicio de acceso a la Internet a estudiantes, docentes, administrativo, visitantes, entre otros, con el fin de mantener la excelencia académica.

Se pretende entonces, que al finalizar este trabajo, se entregue una evaluación del análisis de desempeño del estándar IEEE 802.11n, con el fin de tener una opción de mejora en la planificación de la red inalámbrica de la Universidad, para evitar interferencias co-canal mediante el uso de canales independientes, esto permitirá cubrir las necesidades actuales de la universidad y satisfacer a los usuarios finales.

3 ANTECEDENTES

Las redes inalámbricas IEEE 802.11 básicamente son inseguras (**Kurose & Ross, s. f.**) y pueden ser interferidas por una serie de factores que ocasionan pérdidas de prestaciones en la red.

Uno de los principales problemas del estándar 802.11 se presenta debido a las interferencias co-canal (misma frecuencia) y canal adyacente, que a pesar de generarse en el sistema mismo es difícil de controlar en la práctica por los procesos aleatorios de

propagación (**Bernal, 2005**). Sin embargo, la interferencia por canal adyacente se puede solucionar con una adecuada canalización frecuencial, mediante la utilización de canales independientes, dejando la posibilidad de la existencia de interferencia co-canal, la cual teóricamente resulta mas perjudicial para el rendimiento de la red (**Sallent Roig, Valenzuela González, & Agustí Comes, s. f.**).

Actualmente, en el campus universitario de la ESPE se tiene un despliegue de aproximadamente 113 puntos de acceso (AP del inglés *Access Point*) Wi-Fi, cada uno con un promedio de 90 estaciones. Cada AP tiene asignado los canales ortogonales 1, 6 y 11 dentro del estándar IEEE 802.11 b/g en la banda de 2.4GHz. Este escenario típico, da lugar a la aparición de interferencias co-canal que conllevan a tener una conexión inalámbrica no del todo estable como debiera y que ocasione cortes en el servicio, retardo en las transmisiones, acceso no permanente a la red, entre otros, teniendo como resultado final, usuarios insatisfechos debido a un servicio inadecuado.

Una vez planteado el problema, se crea entonces la necesidad de dar una posible solución al mismo, mediante la toma de mediciones y análisis del desempeño del estándar IEEE 802.11n bajo dos escenarios de prueba, mediana y completamente interferidos.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Analizar el rendimiento del estándar IEEE 802.11n, en un ambiente de laboratorio bajo dos escenarios de prueba, mediante métricas de desempeño.

4.2 Objetivos Específicos

1. Determinar las características principales y relevantes del estándar IEEE 802.11n.
2. Realizar mediciones de las métricas de desempeño del estándar IEEE 802.11n en un ambiente interior mediana y completamente interferido.
3. Realizar un análisis comparativo de las métricas de desempeño de los dos escenarios de prueba.
4. Realizar una propuesta de mejora de la red inalámbrica instalada en el campus universitario de la ESPE, que permita tener un mejor esquema de calidad de servicio QoS.
5. Realizar un estudio técnico de factibilidad, avalado en el análisis de resultados.
6. Realizar el borrador de una artículo científico del caso de estudio.

5 DESARROLLO CASO DE ESTUDIO

5.1 ESTÁNDAR IEEE 802.11N

En la actualidad, la tecnología de comunicación inalámbrica es una de las más utilizadas para el acceso a la red (Lara Cueva, Fernández Jimenez, & Morales Maldonado, 2016), con su estándar IEEE 802.11, dedicado a redes de área local inalámbrica (WLANs).

El estándar IEEE 802.11n es un desarrollo de la nueva generación Wi-Fi, ratificado en Septiembre del 2009, que nació como una propuesta de enmienda, con el fin de mejorar significativamente el rendimiento de la red inalámbrica, proporcionando mayor velocidad y más alcance mediante características adicionales como el uso de antenas MIMO (del inglés *Multiple-input Multiple-output*) y modulación OFDM (Escudero Pascual, 2007).

Mayor rendimiento (*throughput*), mayor rango de alcance, más capacidad de la red, uso eficiente del espectro, bajo consumo, compatibilidad con los estándares IEEE 802.11a/b/g, coexistencia de redes, son las principales ventajas que ofrece el estándar IEEE 802.11n (Facchini, 2010).

5.1.1 Principales características del estándar IEEE 802.11n

De acuerdo a (Cuesta Palacios & Romero Leon, 2013), se resumen la principales características del estándar 802.11n en las siguientes:

- Tecnología MIMO
- Modulación OFDM/ Modulación multitono discreta (DMT)
- Tasa teórica máxima de 600Mbps
- Doble banda de operación de 2.4GHz y 5GHz
- Ancho de canal de 40MHz
- Optimización de carga útil

5.1.1.1 Tecnología MIMO

MIMO es un sistema de transmisión inalámbrico que proporciona la capacidad de “transmitir y recibir simultáneamente sobre múltiples antenas; y nos sirve para transferir múltiples flujos de datos, es decir colocar más bits en el aire en el mismo tiempo y alcanzar velocidades de datos mayores (multiplexado espacial); o puede servir para transmitir y recibir copias del mismo flujo de datos sobre múltiples antenas para incrementar el rango de alcance (diversidad espacial)”(Facchini, 2010).

“El multitrayecto¹ suele percibirse como una interferencia que degrada la calidad de la señal en recepción; sin embargo MIMO hace de esto, una oportunidad para resolver espacialmente la recepción de múltiples señales, con una ganancia mayor asociada” (Cuesta Palacios & Romero Leon, 2013).

5.1.1.2 Modulación OFDM

La técnica OFDM (del inglés *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), permite maximizar el ancho de banda del canal mediante la transmisión de “múltiples señales simultáneamente pero en diversas frecuencias ortogonales, cada una es modulada sobre una portadora separada en el espectro asignado, de donde, las portadoras separadas se las conoce como subportadoras”(Cuesta Palacios & Romero Leon, 2013).

A través de esta técnica se consigue transmitir grandes cantidades de datos en cada canal sobre una onda de radio.

5.1.1.3 Tasas de transferencia

El estándar 802,11n propone una tasa de transferencia máxima teórica de 600Mbps con un ancho de canal de 40MHz , sin embargo, los productos actualmente disponibles no

¹ **Multitrayecto:** Cuando una señal viaja por diferentes caminos a un solo receptor (Facchini, 2010)

permiten más de 300 Mbps con un ancho de canal de 20MHz («La tasa de transferencia de 802.11n», 2009).

La tasa de transferencia ofrecida depende de algunos factores tales como, la multiplexación espacial (SDM) entre 1 y 4 cadenas de bits, la forma de modulación, ancho de banda asignado, posibilidad de implementar SGI (del ingles *Short Guard Interval*), etc («La tasa de transferencia de 802.11n», 2009)

La combinación de estos factores da lugar a 127 tasas de transferencia diferentes, pero el estándar establece algunas de ellas obligatorias para los productos comerciales: 6.5Mbps, 13Mbps, 26Mbps, 52Mbps, 117Mbps y 130Mbps (Lara Cueva et al., 2016)

5.1.1.4 Frecuencia de operación

El estándar IEEE 802.11n puede trabajar en dos bandas de frecuencia, 2.4GHz y 5GHz, garantizando una completa compatibilidad con los estándares b, g y a (Cuesta Palacios & Romero Leon, 2013).

A continuación se presenta un cuadro comparativo con las ventajas y desventajas de usar cada una de ellas.

Tabla 1.
Frecuencias de operación 2.4GHz y 5GHz: Ventajas y desventajas. («Linksys», s. f.)

Banda	2.4 GHz	5 GHz
Espectro Inalámbrico	Más bajo	Más alto
Canal	3 canales no superpuestos	23 canales no superpuestos
Alcance	Mayor	Menor
Atenuación	Menor	Mayor
Interferencia	Más alta	Más baja
Velocidad de la red	Depende del entorno	Depende del entorno
Compatibilidad	802.11b y 802.11g	802.11a
Aplicación	Exploración en internet /Correo electrónico	Transmisiones ininterrumpidas (Audio, video, música, etc.)

5.1.1.5 Ancho de Canal

El estándar IEEE 802.11n puede trabajar con dos anchos de canal de transmisión, 20MHz y 40MHz (Cuesta Palacios & Romero Leon, 2013). Aprovecha una técnica llamada “*channel bounding*” (canal envolvente) para conseguir utilizar dos canales a la vez, obteniendo un único canal de 40 MHz y velocidades de hasta 108 Mbps (s. f.), lo que permite transmitir más del doble de información.

5.1.1.6 Agregación de Tramas

IEEE 802.11n incorpora una tecnología de optimización de carga útil o agregación de tramas, que implica que una mayor cantidad de datos pueden ser agregados en cada paquete enviado (Cuesta Palacios & Romero Leon, 2013), esto lo logra reduciendo la transmisión de encabezado. Adicionalmente reduce el espacio entre tramas reduciendo el tiempo de la transmisión, consiguiendo incrementar la eficiencia y rendimiento de la red.

5.2 INTERFERENCIAS

Las interferencias se pueden definir como un proceso que altera, modifica o destruye una señal durante su trayecto en el canal de transmisión entre el emisor y el receptor (Ramón Ramírez, 2015).

Las interferencias en una red inalámbrica afectan el rendimiento de la misma, ya que no se obtiene el comportamiento óptimo esperado en cuanto a los servicios que se ofrece al usuario final. Entre las principales interferencias que afectan el rendimiento de una red inalámbrica se tienen las interferencias co-canal y las interferencias de canal adyacente.

5.2.1 Interferencia Co-canal

Las interferencias co-canal se producen cuando la señal se ve degradada por otros servicios que utilizan el mismo canal radioeléctrico (Ramón Ramírez, 2015), en otras palabras, cuando un cliente escucha tráfico de otro que utiliza el mismo canal.

Estas interferencias se generan por la reutilización de la misma frecuencia por parte de varias celdas en una área de cobertura determinada y puede ser mayor o menor dependiendo del número de celdas que conformen dicha área y la separación física entre ellas para proporcionar un suficiente aislamiento (Scricca Yanes, 2013). Es decir, al existir una gran cantidad de celdas, la separación entre celdas co-canal (celdas que utilizan la misma frecuencia), será menor y por tanto se incrementará la interferencia.

5.2.2 Interferencia de canal adyacente

“Las interferencias entre canales adyacentes son procedentes de señales que son adyacentes en frecuencia a la señal deseada. Estas interferencias se pueden producir por imperfecciones en los filtros de los receptores y transmisores, que permiten a las frecuencias cercanas interferir dentro de la banda pasante”. (Scricca Yanes, 2013).

La interferencia de canal adyacente podría reducirse con una adecuada canalización y una óptima filtración, por lo que se convierte en menos perjudicial al rendimiento de la red, que la interferencia co-canal. (Scricca Yanes, 2013).

Para definir la calidad de la señal recibida en términos de interferencia se utiliza la relación portadora a interferencia, C/I, medida en decibelios (dB) (Ramón Ramírez, 2015). Esta relación expresa la potencia de la portadora de la señal deseada y la potencia de la señal de interferencia.

$$C/I = W_{t,S} + G_{T,S} - L_{bas,S} - W_{t,I} - G_{T,I} + L_{bas,I} + L_{diag} + L_{pol} \quad (1)$$

5.3 MÉTRICAS DE DESEMPEÑO

Una red de comunicaciones soporta diferente tipo de tráfico (Voz, Vídeo, Datos, etc.) simultáneamente sobre una misma infraestructura. Cada tipo de tráfico tiene diferentes características y por tanto diferentes requerimientos, por ejemplo: la VoIP es sensible al retardo y *jitter*, contrario al tráfico FTP, tráfico TCP es tolerante a la pérdida de paquetes (*packet loss*), otras no (Vídeo, Voz) (Chafra, 2014).

De acuerdo a (Chafra, 2014), las principales métricas de desempeño a ser analizadas para un determinado tráfico son:

- Retardo (ms)
- *Jitter* (ms)
- Paquetes perdidos (%)
- Rendimiento (Mbps)

5.3.1 Retardo *End-to-End* [ms]

Especifica el tiempo que demora un paquete de datos en viajar desde un punto emisor a otro receptor (Cuesta Palacios & Romero Leon, 2013).

El retardo en la transmisión se añade debido a que los paquetes de datos tienen que atravesar múltiples dispositivos y links (Chafra, 2014).

El retardo tiene gran importancia en eventos de tiempo real. Se tienen dos formas de medirlo: el retardo en un sentido (OWD del inglés *One Way Delay*) y el retardo de ida y vuelta (RTT del inglés *Round Trip Time*). El OWD se puede medir sin problemas en entornos de laboratorio, en el que la información de los eventos esta disponible al usuario (Saldaña Medina, 2011). “La medida del OWD exige ser capaz de enviar un paquete con una marca temporal (*timestamp*) en el origen y compararlo con el *timestamp* en el destino, es decir, necesita controlar ambos extremos del camino. Además, para que el *timestamp* sea significativo, es necesario que los relojes de ambos extremos estén sincronizados”. (Hernández, Magaña, Izal, & Morató, 2007)

La sincronización se consigue cuando los equipos trabajan con una señal de reloj idéntica o lo más parecido en frecuencia y fase, garantizándose que no existan valores negativos ni muy desfasados (Lara Cueva et al., 2016).

Para la medida de éste y otros parámetros de QoS se utiliza, comúnmente, diferentes softwares inyectoros de tráfico, que se mencionan en otro apartado.

Matemáticamente, el retardo o latencia es igual a Retardo de propagación + Tiempo de transmisión + Tiempo de cola + Retardo de procesamiento

$$\delta = t_p + t_{tx} + t_{cola} + t_{pr} \quad (2)$$

5.3.1.1 Protocolo NTP

Network Time Protocol (NTP), está construido sobre el protocolo UDP y sirve para sincronizar un conjunto de relojes de red usando un conjunto distribuido de clientes y servidores. (Mills, 1985). NTP permite sincronizar el reloj de un dispositivo, en el orden de los milisegundos, con respecto a la Hora Universal Coordinada (UTC), que es la hora adoptada como la escala de tiempo estándar en la mayor parte del mundo.(De Nova Segundo, s. f.)

5.3.2 Jitter (Variación de retardo) [ms]

“Los paquetes en la red experimentan distintas cantidades de retardo. El retardo de un paquete varía a lo largo del camino entre el transmisor y el receptor. Esta variación en el retardo, se conoce como *jitter* y afecta la calidad del flujo de audio y/o vídeo; las causas más comunes para su aparición son: tiempos largos de espera de conexión, congestión del tráfico y la interferencia” (Cuesta Palacios & Romero Leon, 2013).

De acuerdo a (Saldaña Medina, 2011) el *jitter* se define como la diferencia entre el retardo en un sentido (OWD) de dos paquetes del mismo flujo y se denomina IPDV (del inglés *Instantaneous Packet Delay Variation*)

$$IPDV = \frac{\sum |retardo_i - retardo_{i-1}|}{n-1} \quad (3)$$

5.3.3 Paquetes perdidos [%]

Es un valor que hace referencia a la cantidad de paquetes fallados antes de llegar a su destino final, la pérdida de dichos paquetes es producida por interferencias, atenuaciones, sobre-flujos o falta de sincronización entre los dispositivos que conforman la red (Cuesta Palacios & Romero Leon, 2013).

Los paquetes también podrían ser desechados (*dropping*) cuando existe congestión en un link, y se puede calcular restando el número de paquetes recibidos del número de paquetes enviados.

$$Pp = p_e - p_r \quad (4)$$

5.3.4 Rendimiento (*Throughput*) [bps]

El rendimiento hace referencia al número de bits reales que se transmiten en un período de tiempo (Cuesta Palacios & Romero Leon, 2013). Corresponde a la tasa de transferencia de datos a través de una red de comunicaciones.

De acuerdo a (Lara Cueva et al., 2016), la eficiencia de una red se consigue de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Ef = \frac{\eta_r}{RBR(\eta_s)} \times 100 \quad (5)$$

donde, η_r corresponde al *throughput* recibido y $RBR(\eta_s)$ es la tasa neta de transmisión (del inglés *Raw Bit Rate*).

En cuanto a software existen varios inyectores de tráfico disponibles en la web, que nos permiten medir las diferentes métricas de desempeño. A continuación se presenta un cuadro comparativo de algunos de ellos con sus ventajas y desventajas.

Tabla 2.

Cuadro comparativo de inyectores de tráfico (Cuesta Palacios & Romero Leon, 2013)

	NETPERF	MGEN	IPERF	D-ITG
Software libre	SI	SI	SI	SI
Sistema Operativo	LINUX	LINUX, WINDOWS, MAC OS	LINUX, WINDOWS	LINUX WINDOWS
Protocolo de red	IPv4, IPv6	IPv4, IPv6	-	IPv4
Protocolo de Transporte	TCP, UDP	UDP	TCP, UDP	TCP, UDP
Interfaz gráfica	Consola	Consola	Consola y JPerf	Interfaz ITTGUI y consola
Métricas de Desempeño	Rendimiento	Rendimiento	Rendimiento, retardo, <i>jitter</i> , tasa de transmisión y ancho de banda	Rendimiento, retardo, <i>jitter</i> , paquetes enviados y perdidos

Como se puede observar en la Tabla 2, todos los inyectores de tráfico listados son de software libre, compatibles con sistemas operativos Windows y Linux, excepto NETPERF que sólo trabaja en LINUX. La mayoría trabaja con el protocolo de red IPv4 e IPv6, excepto IPERF que no especifica y D-ITG que sólo trabaja con IPv4. El protocolo de transporte a usar es TCP y UDP, excepto MGEN que solo trabaja con UDP. Todos permiten la interacción con el usuario a través de consola, pero los que presentan mayores ventajas son IPERF y en especial D-ITG porque permite medir un mayor número de métricas de desempeño que los otros y es de libre distribución, razón por la cual es el más usado.

5.4 ESTADO DEL ARTE DEL DESEMPEÑO DE REDES INALÁMBRICAS BASADAS EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11N

Actualmente, una de las tecnologías que se ha posicionado en el ámbito de las comunicaciones es la inalámbrica, con su estándar IEEE 802.11, convirtiéndose en la más utilizada para acceder a la red, gracias, principalmente, al bajo costo que representa su implementación comparada con la red cableada y a la ventaja que presenta su infraestructura para ser usada en zonas alejadas geográficamente. Por ello, ésta tecnología se encuentra en constante investigación, tratando de brindar al usuario una buena calidad de servicio en cuanto a comunicación se refiere.

Es así, que existen trabajos sobre la cobertura del estándar IEEE 802.11 en ambientes interiores, como por ejemplo en (García Fernández, 2006), donde se propone un modelo de predicción de cobertura en redes inalámbricas basado en la técnica de radiosidad. Esta propuesta permite predecir el comportamiento físico de la propagación de las señales de radiofrecuencia en los estándares IEEE 802.11a, IEEE 802.11b e IEEE 802.11g. En (Davies, Grout, & Picking, 2008) también se realizan mediciones en ambientes interiores, del nivel de la señal, usando el estándar IEEE 802.11, pero no se realizan comparaciones entre sus variantes.

En (Sendra, Fernandez, Turro, & LLoret, 2010) y en su trabajo extendido (Sendra, Garcia, Turro, & LLoret, 2011), se compara los estándares IEEE 802.11 a/b/g/n en ambientes interiores en función del RSSI (de inglés, *Received Signal Strength Indication*), área de cobertura e interferencias entre canales, usando diferente hardware WLAN. En éste artículo se llega a la conclusión de que los estándares IEEE 802.11b/n son los que mejor cobertura tienen en áreas cercanas, a diferencia de los estándares IEEE 802.11g/a que tienen la peor respuesta, mientras que, en largas distancias, el estándar IEEE 802.11b tuvo un mejor desempeño que los estándares IEEE 802.11g/n. En cuanto a la influencia de interferencias entre canales vecinos, tuvo mucho que ver el tipo de hardware usado, es así que, en relación al número de paquetes perdidos, los estándares que menos pérdidas tuvieron fueron el IEEE 802.11b y el IEEE 802.11g. De igual manera, en (Sendra, LLoret, Turro, & Aguiar, 2014) se compara los estándares IEEE 802.11a/b/g/n en un estudio analítico de la potencia de la señal generada por un *access point* dentro de diferentes puntos de un edificio, con el fin de determinar el mejor

lugar para colocar los sensores. También compara la interferencia entre canales para cada tecnología. Se concluyó, que el estándar IEEE 802.11b genera una mayor intensidad de la señal en función de la distancia, a diferencia de los estándares IEEE 802.11g e IEEE 802.11n. Este resultado permitió reducir el número de sensores necesarios para cubrir una determinada área. En cuanto a la segunda comparación, el estándar IEEE 802.11g tuvo un mejor desempeño contra las interferencias.

En (Lara Cueva et al., 2016) se realiza una comparación de los estándares IEEE 802.11b/n y WDS y se obtiene un análisis del desempeño de los mismos en función de la distancia en altura, en tres pisos de un edificio con el transmisor fijo en el primero. Los parámetros a evaluar fueron el *throughput* normalizado, retardo, *jitter* y paquetes perdidos. Los resultados obtenidos indican que el IEEE 802.11n se desempeña mejor a bajas alturas, mientras que los estándares IEEE 802.11 b y WDS tienen un mejor desempeño a mayor altitud, a pesar de tener como obstáculo los pisos inferiores. En forma general, se concluyó que WDS es el estándar que presenta valores más bajos de retardo, *jitter* y paquetes perdidos, y es más eficiente, excepto en el escenario de menor altura en el que se destaca el estándar IEEE 802.11n.

El uso de la tecnología MIMO en el estándar IEEE 802.11n ha incorporado algunas ventajas que permiten mejorar el rendimiento de una red inalámbrica, es así, que en (Cuesta Palacios & Romero Leon, 2013) respecto a la ventaja de usar MIMO sobre SISO se realiza un estudio teórico-práctico del desempeño del estándar IEEE 802.11n e IEEE 802.11a en enlaces de larga distancia y concluye que MIMO con dos flujos espaciales permitió incrementar la tasa de transmisión, aumentar la cobertura, y disminuir el retardo y el *jitter*. De igual manera, el uso del ancho de canal de 20MHz y 40MHz también permitió aumentar la eficiencia de la red respecto al uso de SISO. En general, la tecnología MIMO en enlaces de larga distancia presentó varias ventajas debido al uso del fenómeno de multitrayectoria contrario a las pruebas con SISO que fueron afectadas negativamente. Así también, (Foschini & Gans, 1998) presenta la ventaja de usar MIMO con un arreglo de 2x2 sobre el uso de una sola antena transmisora/receptora, en función del SNR.

Continuando con el despliegue de las redes inalámbricas en largas distancias, en (LLoret, Lopez, & Ramos, 2003) se realiza un estudio sobre las mediciones obtenidas

del nivel de la señal transmitida por un grupo de puntos de acceso ubicados en un campus universitario y la interferencia entre canales. El resultado del estudio propone reducir la cantidad de AP's y determinar una localización óptima de los mismos para tener una mejor cobertura tanto en ambientes interiores como en exteriores dentro del campus y reducir presupuesto e interferencias.

En cuanto al problema de interferencias, debido a su amplia utilización, las redes inalámbricas están generando, en mayor o en menor medida dependiendo de la aplicación, saturación de canales que provoca interferencia entre los mismos, por tanto, en (Mengual, Garcia Villegas, & Vidal, 2013) se propone el uso de canales parcialmente solapados 1, 5, 9 y 13, para mejorar el rendimiento de la red tradicional en la que se asignan los tres canales ortogonales 1, 6 y 11. La propuesta concluye, después de varias pruebas reales dentro de un campus universitario, que esta asignación de canales proporciona ventajas tanto en el enlace descendente como en el ascendente, especialmente en los instantes de mayor carga de la red inalámbrica. Sin embargo, en (Guevara & Serna, 2013) se confirma el hecho de que la transmisión de información en canales no solapados tiene un mayor desempeño que en los canales con interferencia por solapamiento, por tanto se propone un procedimiento para instalar una red inalámbrica libre de interferencias.

Finalmente, el estándar IEEE 802.11 está teniendo mucha importancia en sistemas de posicionamiento, mediante el uso del indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI) por diferentes puntos de acceso, como en (Garcia, Tomas, Boronat, & LLoret, 2009), donde se describen dos enfoques diferentes para encontrar la posición de diferentes sensores inalámbricos instalados dentro de un edificio.

En conclusión existen algunos trabajos relacionados, en forma general, al desempeño del estándar IEEE 802.11. No se ha podido encontrar mucha investigación relacionada únicamente con el estándar IEEE 802.11n, pero sí se tiene comparaciones de su desempeño con otras variantes del estándar IEEE 802.11.

5.5 METODOLOGÍA

Para obtener las métricas de desempeño a ser analizadas, *throughput* normalizado, retardo, *jitter* y paquetes perdidos, se usó la técnica intrusiva de inyección de tráfico mediante el software de libre distribución D-ITG (del inglés *Distributed Internet Traffic Generator*).

La toma de mediciones se realizó bajo dos escenarios de prueba, mediana y completamente interferidos. En el escenario medianamente interferido se trabajó con los canales ortogonales 1, 6 y 11, configurados en tres APs diferentes, cada uno de los cuales representa una red. A continuación se realizó el procedimiento de inyección de tráfico para tomar las mediciones de las métricas a ser analizadas.

En el escenario completamente interferido se utilizó sólo el canal 1, configurado en los tres APs, los cuales representan una red diferente y se procedió a realizar la respectiva inyección de tráfico para la toma de mediciones. Este procedimiento se repitió para los canales 6 y 11.

5.5.1 Materiales

Para la ejecución de las mediciones, se ha utilizado 6 computadores portátiles con diferentes características y tres APs de la misma marca y modelo. El hardware utilizado para el estudio tiene las siguientes especificaciones:

Tabla 3.
Computadores portátiles del primer AP (Red 1).

Parámetros	Transmisor	Receptor
Memoria RAM	8 GB	4 GB
Procesador	Intel 2.67 GHz	Intel 2.4 GHz
Sistema Operativo	Linux (Ubuntu 12.04)	Linux (Ubuntu 12.04)
Tarjeta de red inalámbrica	Wireless - N	Advanced – N

Tabla 4.
Computadores portátiles del segundo AP (Red 2).

Parámetros	Transmisor	Receptor
Memoria RAM	6 GB	8 GB
Procesador	Intel Core i5/ 2.3 GHz	Intel Core i7 / 2.4 GHz
Sistema Operativo	Linux (Ubuntu 12.04)	Linux (Ubuntu 12.04)
Tarjeta de red inalámbrica	Wireless LAN 802.11 a/b/g/n	Wireless LAN 802.11 a/b/g/n

Tabla 5.
Computadores portátiles del tercer AP (Red 3).

Parámetros	Transmisor	Receptor
Memoria RAM	4 GB	4 GB
Procesador	Intel Pentium 2.56 GHz	Intel Core i3 2.3 GHz
Sistema Operativo	Linux (Ubuntu 12.04)	Linux (Ubuntu 12.04)
Tarjeta de red inalámbrica	Wireless 802.11 b/g/n	Wireless- N

Tabla 6.
Router Linksys E4200

Parámetros	Descripción
Protocolo 802.11	a/b/g/n
Banda de frecuencia (GHz)	Doble banda: 2.4 GHz y 5 GHz
Velocidad Máxima (Mbps)	300 para 2.4 GHz 450 para 5 GHz
Tecnología de las antenas	MIMO 3x3
Amplificadores Wi-Fi	2 SiGe 2528L045CA para 2.4 GHz 3 SE2594L para 5 GHz
CPU	Broadcom BCM4718A1KFBG a 480 MHz
Memoria RAM	64 MB

El análisis de los datos adquiridos se lo realiza por medio de la herramienta matemática MATLAB®.

5.5.2 Escenarios de prueba

Todos los escenarios de prueba constan de tres redes inalámbricas diferentes y se desarrollan dentro de un ambiente interno de laboratorio. En la Figura 1 se muestra el escenario de prueba utilizado en todas las mediciones.

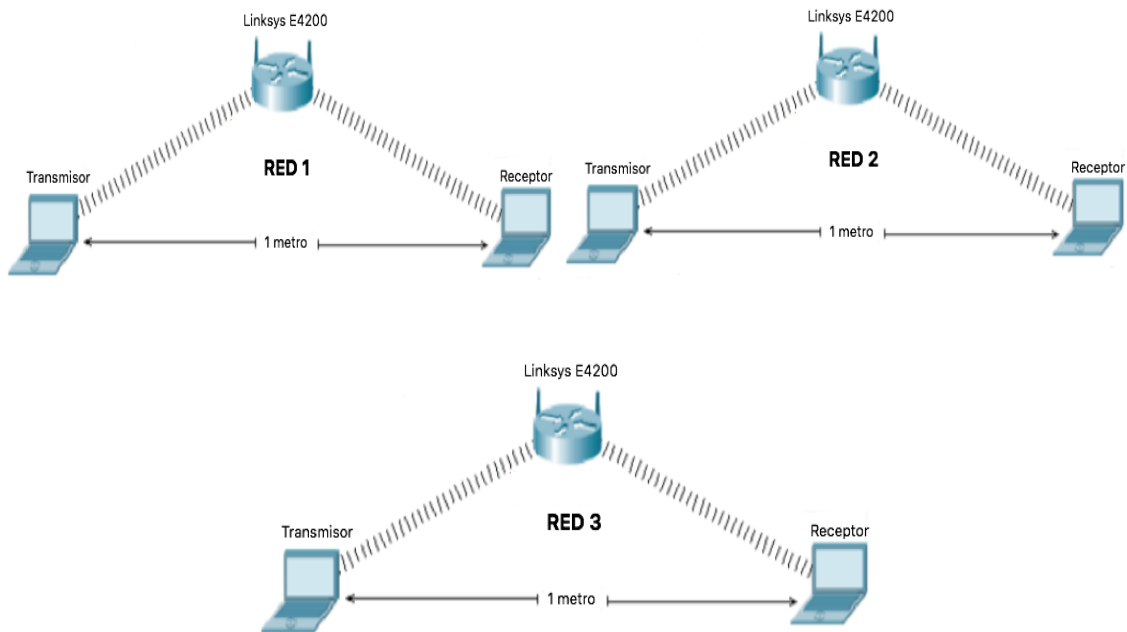


Figura 1. Escenario de prueba para todas las mediciones

En el escenario medianamente interferido, se configuró el canal 1 para la red 1, el canal 6 para la red 2 y el canal 11 para la red 3.

En el escenario de prueba completamente interferido, las tres redes inalámbricas se configuran para el mismo canal. Este escenario se repite tres veces; en primer lugar, con el canal 1, en segundo lugar, con el canal 6 y por último con el canal 11.

5.5.3 Métodos

5.5.3.1 Asignación de canales

En el escenario medianamente interferido, se asignó los canales 1, 6 y 11 a las redes 1, 2 y 3 respectivamente. Imagen de fondo obtenida de (Peñaranda Rangel & Castellanos Leon, 2016)

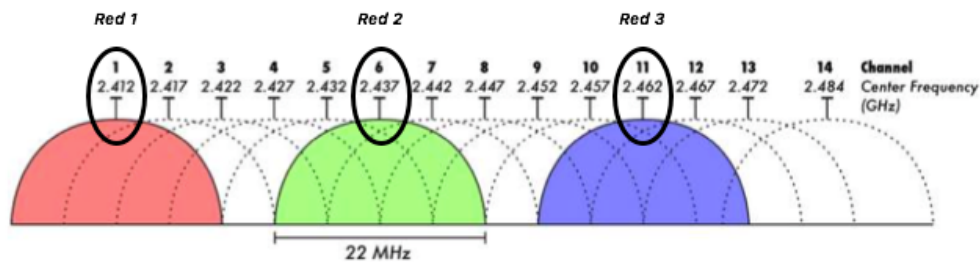


Figura 2. Escenario medianamente interferido.

En el escenario completamente interferido se recreó una interferencia de tipo co-canal, en el cual las tres redes ocuparon el mismo canal. A continuación se indica gráficamente la asignación de canales. La imagen de fondo se obtuvo de (Peñaranda Rangel & Castellanos Leon, 2016).

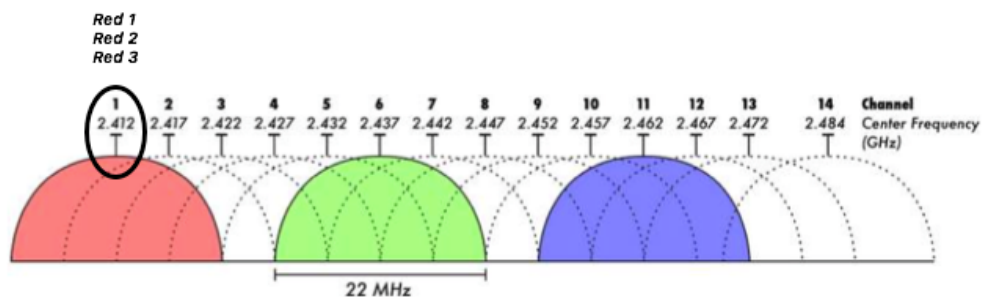


Figura 3. Escenario completamente interferido: Asignación de Canal 1 a las tres redes.

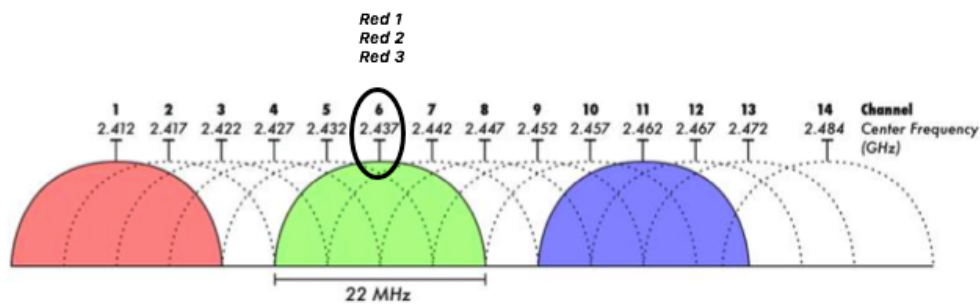


Figura 4. Escenario completamente interferido: Asignación de Canal 6 a las tres redes.

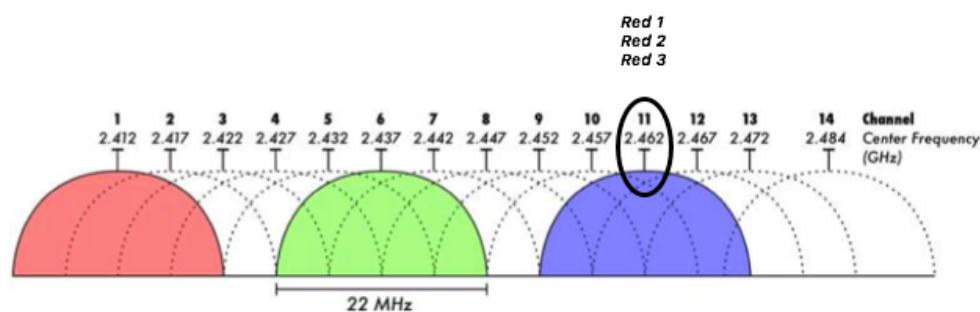


Figura 5. Escenario completamente interferido: Asignación de Canal 11 a las tres redes.

5.5.3.2 Configuraciones

La configuración de red está definida bajo el estándar IEEE 802.11n, con una tasa de transmisión auto-configurada por el equipo sobre un ancho de canal de 20MHz, de acuerdo a la funcionalidad de codificación y modulación adaptativa.

El router Linksys E4200 fue configurado como un punto de acceso con los siguientes parámetros:

Tabla 7.

Configuración del Router.

Parámetros de configuración	Router Linksys E4200
Banda de frecuencia	2.4 GHz
Modo de RED	Wireless-N Only
Ancho de canal	Auto (20 MHz ó 40 MHz)
SSID	Red 1/ Red 2/ Red 3 respectivamente
Canal inalámbrico	1/6/11 Dependiendo del escenario de prueba

Los equipos de transmisión y recepción deben tener sincronizado su reloj interno. Ésta sincronización se estableció mediante el protocolo NTP (del inglés, *Network Time Protocol*), el cual se usa generalmente para sincronizar relojes en internet. En este caso las redes implementadas no están conectadas a Internet, por lo que se sincronizan los relojes creando un servidor propio, como se explica en (Lara Cueva et al., 2016)

Finalmente, ambos equipos se conectaron a la misma red mediante el Identificador de Set de Servicio (SSID, del inglés *Service Set Identifier*) y la comprobación de conectividad de los mismos.

5.5.4 Técnica intrusiva de inyección de tráfico

La técnica intrusiva de inyección de tráfico utilizada para este estudio se la realizó mediante la herramienta D-ITG, por ser una plataforma de software libre que permite generar tráfico a nivel de paquetes y tiene la ventaja de presentar todas las métricas de desempeño que van a ser analizadas en este trabajo: *Throughput* normalizado, retardo, *jitter* y paquetes perdidos.

La arquitectura y componentes de D-ITG se resumen a continuación:

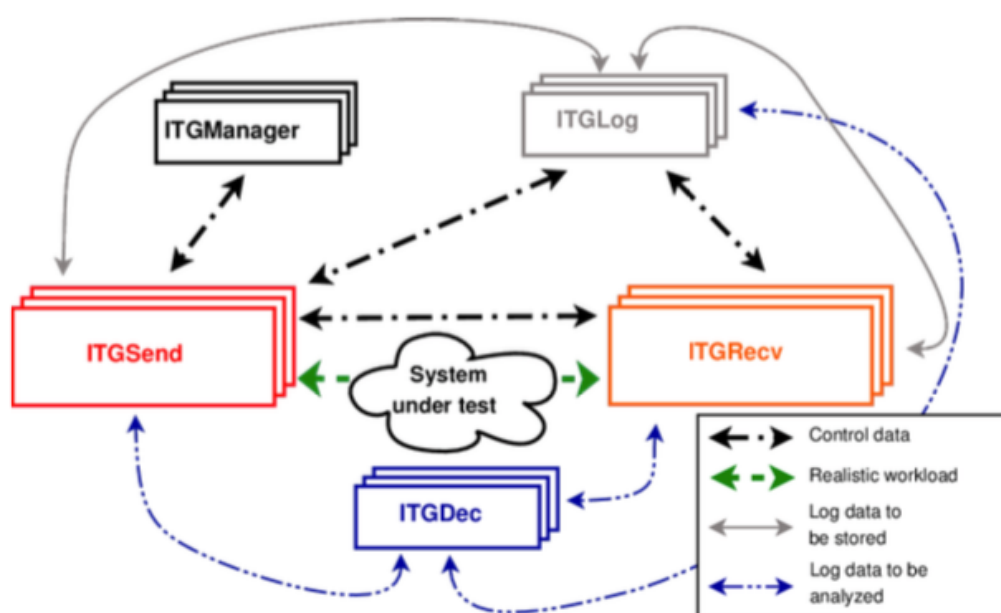


Figura 6. Arquitectura D-ITG (Rodríguez Mata, 2015)

- ITGSend: Remitente de D-ITG

El componente ITGSend es responsable de generar los flujos de tráfico (Rodríguez Mata, 2015).

- ITGRecv: Receptor de D-ITG

El componente ITGRecv se encarga de recibir tráfico paralelo de múltiples flujos generados por una o más instancias ITGSend (Rodríguez Mata, 2015).

- ITGLog: Logger de D-ITG

El componente ITGLog es responsable de recibir y almacenar información de registro enviado por ITGSend y ITGRecv. (Rodríguez Mata, 2015).

- ITGDec: Decodificador de D-ITG

El componente ITGDec es responsable de decodificar y analizar los archivos de registro almacenados durante los experimentos llevados a cabo mediante el uso de D-ITG.

ITGDec analiza los archivos de registro generados por ITGSend y ITGRecv y calcula los valores promedio de la tasa de bits, retardo y jitter en toda la duración del experimento o en intervalos de tiempo de tamaño variable (Rodríguez Mata, 2015).

5.5.4.1 Configuración de la GUI del D-ITG

Para proceder a la obtención de los valores de las métricas de desempeño a ser analizadas, se procede primero a configurar la GUI del D-ITG en el lado del transmisor, para determinar el valor de la tasa de transmisión máxima que soporta cada red en los diferentes escenarios de prueba. Para esto se realizaron diferentes inyecciones de tráfico, tomando como punto de partida la tasa de transmisión teórica del estándar IEEE 802.11n, de 300Mbps sobre un ancho de canal de 20MHz. Ésta tasa de transmisión se varía hasta conseguir una pérdida de paquetes menor al 3%, aconsejable en aplicaciones en tiempo real (UIT-T, 2001), para lo cual se utilizó el protocolo UDP y se consideró solo el tiempo que tarda un paquete en viajar desde el transmisor al receptor, usando el parámetro “*One-Way Delay*” recomendado para trabajar en entornos de laboratorio en el que la información de los eventos está disponible al usuario (Saldaña Medina, 2011).

Una vez determinada la tasa de transmisión máxima, considerando la capacidad máxima del canal, y el número de paquetes a ser enviados en cada prueba, se configura nuevamente la GUI del D-ITG para 10 inyecciones de tráfico, este número se considera adecuado para reducir el error cuadrático medio² y realizar un análisis estadístico de las métricas de desempeño en cuestión.

La duración de las transmisiones está limitada a 30 segundos, tiempo prudencial, tomando en cuenta que al estar en un ambiente de laboratorio, en realidad no existen obstrucciones, además de estar trabajando con redes relativamente pequeñas, máximo 1m de separación entre dispositivos. Se replica la misma configuración en todos los escenarios.

Tabla 8.

Configuración de D-ITG: Escenario medianamente interferido

Parámetros	Red 1 (Canal 1)	Red 2 (Canal 6)	Red 3(Canal 11)
Métrica	One way delay	One way delay	One way delay
Duración (s)	30	30	30
Inicio del retardo (s)	0	0	0
Protocolo	UDP	UDP	UDP
Tasa de transmisión (Mbps)	9.42	13.1	12.28
Tamaño de Paquetes (bytes)	512	512	512
Paquetes inyectados (pkt/s)	2300	3200	3000
Host de destino	IP Receptor	IP Receptor	IP Receptor

Tabla 9.

Configuración de D-ITG: Escenario completamente interferido, canal 1.

Parámetros	Red 1	Red 2	Red 3
Métrica	One way delay	One way delay	One way delay
Duración (s)	30	30	30
Inicio del retardo (s)	0	0	0
Protocolo	UDP	UDP	UDP
Tasa de transmisión (Mbps)	7.941	6.48	7.1
Tamaño de Paquetes (bytes)	512	512	512
Paquetes inyectados (pkt/s)	2000	1600	1800
Host de destino	IP Receptor	IP Receptor	IP Receptor

² **Error Cuadrático Medio:** Medida del promedio de los errores al cuadrado (Render, Stair, & Hanna, 2006).

Tabla 10.

Configuración de D-ITG: Escenario completamente interferido, canal 6.

Parámetros	Red 1	Red 2	Red 3
Métrica	One way delay	One way delay	One way delay
Duración (s)	30	30	30
Inicio del retardo (s)	0	0	0
Protocolo	UDP	UDP	UDP
Tasa de transmisión (Mbps)	5.714	6.9	8.1
Tamaño de Paquetes (bytes)	512	512	512
Paquetes inyectados (pkt/s)	1400	1700	2000
Host de destino	IP Receptor	IP Receptor	IP Receptor

Tabla 11.

Configuración de D-ITG: Escenario completamente interferido, canal 11.

Parámetros	Red 1	Red 2	Red 3
Métrica	One way delay	One way delay	
Duración (s)	30	30	30
Inicio del retardo (s)	0	0	0
Protocolo	UDP	UDP	UDP
Tasa de transmisión (Mbps)	5.721	7.3	5.721
Tamaño de Paquetes (bytes)	512	512	512
Paquetes inyectados (pkt/s)	1400	1800	1400
Host de destino	IP Receptor	IP Receptor	IP Receptor

5.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE MEDICIONES

5.6.1 Resultados

En esta sección se presentan los resultados entregados por el software D-ITG, una vez realizadas las 10 inyecciones de tráfico en cada escenario de prueba, para cada métrica de desempeño. Ver anexos del 1 al 11.

5.6.1.1 *Throughput normalizado*(η)

Para el cálculo de éste parámetro se usó la ecuación (6).

$$\eta = \frac{\eta_r}{RBR(\eta_s)} \quad (6)$$

donde η_r corresponde al *throughput* medio, recibido en las 10 transmisiones, para cada caso y el RBR (del inglés *Raw Bit Rate*), corresponde a la tasa de transmisión teórica. Este último valor está referido a lo marcado por el equipo y en conformidad con lo que indica el estándar IEEE 802.11n, por tanto, como se puede observar en la Tabla 12, el RBR utilizado en el escenario medianamente interferido fue de 13Mbps, valor referencial para los escenarios completamente interferidos.

Tabla 12.

Datos para el cálculo del *throughput* normalizado en el escenario medianamente interferido.

Red / # de Canal	Throughput Medio (Mbps)	RBR (Mbps)
1 / canal 1	7.64	13
2 / canal 6	10.00	13
3 / canal 11	11.69	13

Tabla 13.

Datos para el cálculo del *throughput* normalizado en el escenario completamente interferido, canal 1.

Red	Throughput Medio (Mbps)	RBR (Mbps)
1	6.32	13
2	3.12	13
3	4.78	13

Tabla 14.

Datos para el cálculo del *throughput* normalizado en el escenario completamente interferido, canal 6.

Red	Throughput Medio (Mbps)	RBR (Mbps)
1	5.60	13
2	4.88	13
3	6.89	13

Tabla 15.

Datos para el cálculo del *throughput* normalizado en el escenario completamente interferido, canal 11.

Red	Throughput Medio (Mbps)	RBR (Mbps)
1	5.14	13
2	4.32	13
3	5.45	13

5.6.2 Comparativa de resultados entre escenarios

Por medio de la herramienta MATLAB y mediante el comando de estadística descriptiva *boxplot*³, se graficaron los resultados obtenidos en cada medición para su respectivo análisis. No se utilizó *toolbox*.

Con el método de inyección intrusiva de tráfico, se identificó el máximo caudal de datos que se puede cursar en un ambiente mediana y completamente interferido, a través de la métrica del *throughput* normalizado, identificándose que éste es el parámetro con el cual se pueden realizar las comparaciones, ya que el resto de métricas de desempeño obedece a la metodología planteada de garantizar un número de paquetes perdidos menores al 3%.

5.6.2.1 Rendimiento (*Throughput* normalizado)

En la Figura 7 se muestran los valores del *throughput* normalizado en todos los escenarios de prueba.

La Figura 7a muestra el escenario medianamente interferido, en el cual se presenta un *throughput* normalizado de 0.6 en la red 1/canal 1, valor más bajo comparado con las otras redes no interferidas, las cuales presentan un *throughput* normalizado de 0.7 en la red 2/canal 6 y 0.9 en la red 3/canal 11, de acuerdo a la mediana⁴ representada por una línea roja dentro de cada *boxplot*.

En los escenarios completamente interferidos se tienen valores menores de *throughput* normalizado, es así que en la Figura 7b se puede observar que para el canal 1, la red 1 tuvo un valor de 0.515, la red 2 de 0.2583 y la red 3 de 0.3612. La Figura 7c muestra que para el canal 6 los valores de *throughput* normalizado fueron de 0.433 para la red 1, 0.385 para la red 2 y 0.5459 para la red 3. Y por último, la Figura 7d muestra un

³ **Boxplot:** Diagrama de caja de una muestra de datos, que se usa para graficar una o mas variables. La caja tiene líneas en el cuartil superior, en el medio y en el cuartil inferior de la caja, también tiene líneas de extensión que indican los datos que están fuera de los límites de la caja (Gil Sanchez & Franco Lemus, 2005).

⁴ **Mediana:** Número central de un grupo de números ordenados por tamaño (Render et al., 2006).

throughput normalizado para el canal 11 de 0.4078 en la red 1, 0.3801 en la red 2 y 0.4112 en la red 3. En este escenario la red que presenta mayor rendimiento respecto a los otros dos, es la red 1 en el canal 1.

De ésta comparación se observa, que la red 3 correspondiente al canal 11 en el escenario medianamente interferido es la que mejor desempeño presenta respecto a las otras dos redes del mismo escenario y respecto a los escenarios completamente interferidos, mientras que la red que tuvo el peor desempeño fue la red 2 correspondiente al canal 1 en el escenario completamente interferido.

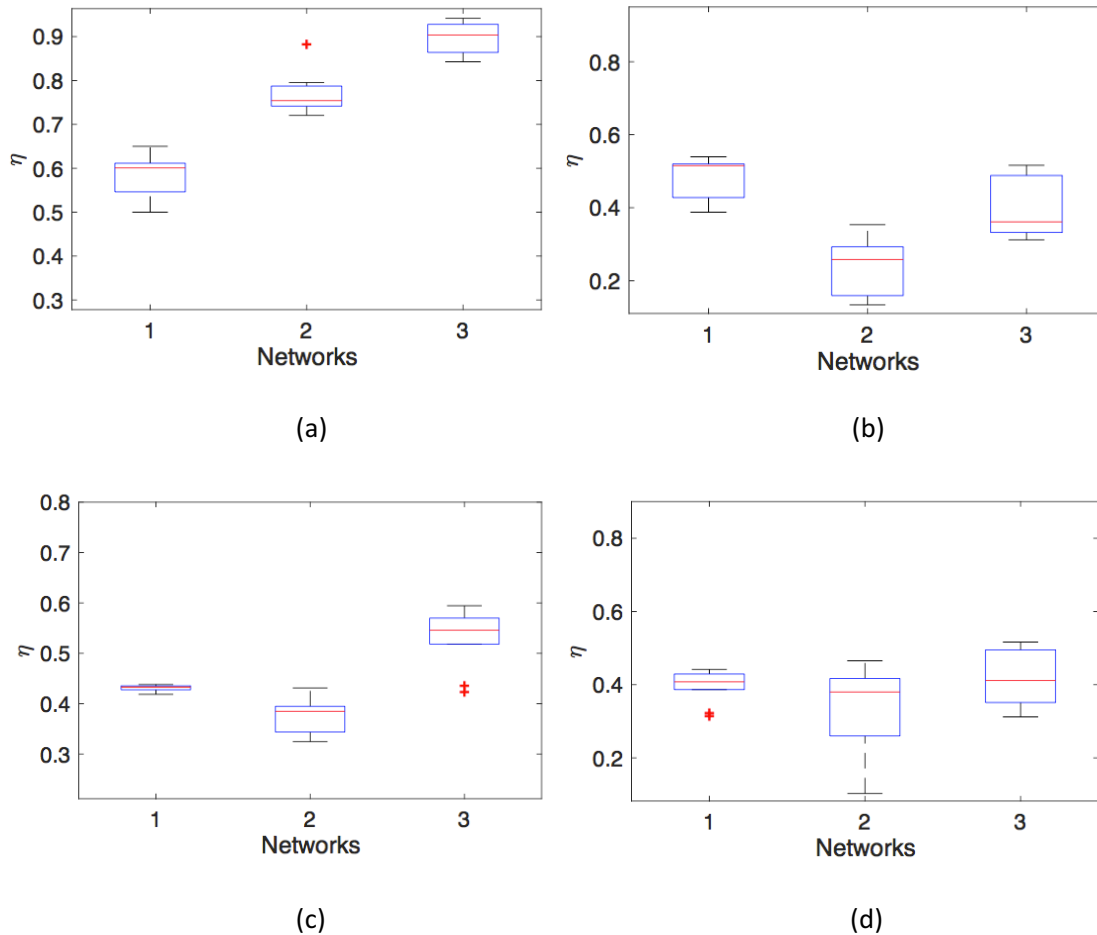


Figura 7. **Rendimiento.** (a) Escenario medianamente interferido . (b) Escenario completamente interferido, canal 1. (c) Escenario completamente interferido, canal 6. (d) Escenario completamente interferido, canal 11.

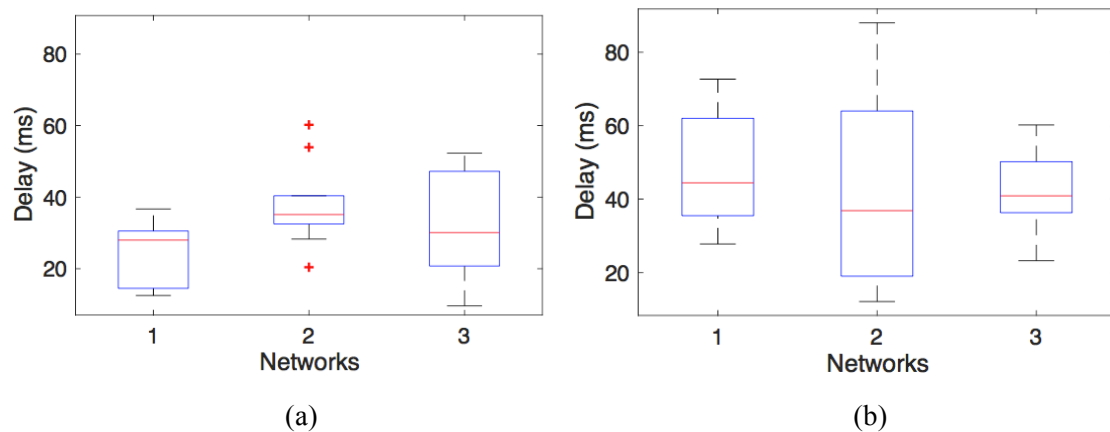
Se puede observar también, que existen datos que caen fuera de los intervalos (*outliers*)⁵, los cuales se consideran datos atípicos que se representan individualmente.

5.6.2.2 Retardo

En la Figura 8 se muestra el retardo obtenido en todos los escenarios de prueba, y se puede observar que el escenario medianamente interferido, como se muestra en la Figura 8a, presenta un retardo de 27.99ms en la red 1/canal 1, 35.14ms en la red 2/canal 6 y 30.10 ms en la red 3/canal 11. En este caso, la red 1 presentó menor retardo durante las mediciones.

En los escenarios completamente interferidos, la Figura 8b muestra los resultados correspondientes al canal 1, en el que se tiene un valor de retardo de 44.44ms en la red 1, 36.85ms en la red 2 y 40.9ms en la red 3. La Figura 8c muestra los resultados del canal 6, cuyos valores de retardo fueron de 32.31ms para la red 1, 19.19ms para la red 2 y 26.2ms para la red 3. Y por último, la Figura 8d muestra los resultados de retardo para el canal 11, los cuales fueron de 30.34ms en la red 1, 19.09ms en la red 2 y 0.005ms en la red 3.

En estos escenarios se puede observar que la red 1 en el canal 1 es la que presenta mayores valores de retardo, mientras que la red que tuvo mejor respuesta, en cuanto a un menor retardo, fue la red 3 en el canal 11.



⁵ **Outliers:** Pueden ser el resultado de errores de la entrada de datos, medidas pobres o interferencias en el sistema que generan datos de forma errónea (Gil Sanchez & Franco Lemus, 2005).

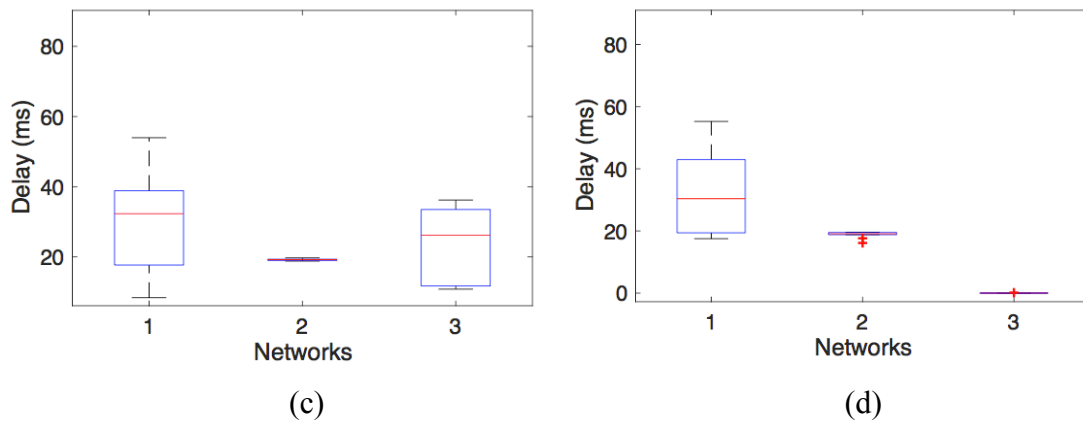


Figura 8. **Retardo.** (a) Escenario medianamente interferido . (b) Escenario completamente interferido, canal 1. (c) Escenario completamente interferido, canal 6. (d) Escenario completamente interferido, canal 11.

5.6.2.3 Jitter

En la Figura 9 se muestra el *jitter* obtenido en todos los escenarios de prueba, y se puede observar, en la Figura 9a, que en el escenario medianamente interferido, el estándar IEEE 802.11n presenta un *jitter* de 0.562ms en la red 1/canal 1, 0.589ms en la red 2/canal 6 y 0.639ms en la red 3/canal 11. Existe concordancia con el retardo en cuanto a que la red 1/canal 1 presentó el valor más bajo de *jitter* comparado con las redes 2/canal 6 y 3/canal 11.

En los escenarios completamente interferidos, la Figura 9b muestra los resultados de *jitter* para el canal 1, los cuales fueron de 1.308ms en la red 1, 0.0016ms en la red 2 y 0.0010ms en la red 3. La Figura 9c muestra los valores de *jitter* para el canal 6, los cuales fueron de 1.02ms para la red 1, 0.0009ms para la red 2 y 0.0010ms para la red 3. Y por último, la Figura 9d muestra los valores de *jitter* para el canal 11, los cuales fueron de 1.303ms en la red 1, 0.0010ms en la red 2 y 0.0011ms en la red 3.

En estos escenarios se observa que se tuvo valores de *jitter* bajos al trabajar en los canales 6 y 11.

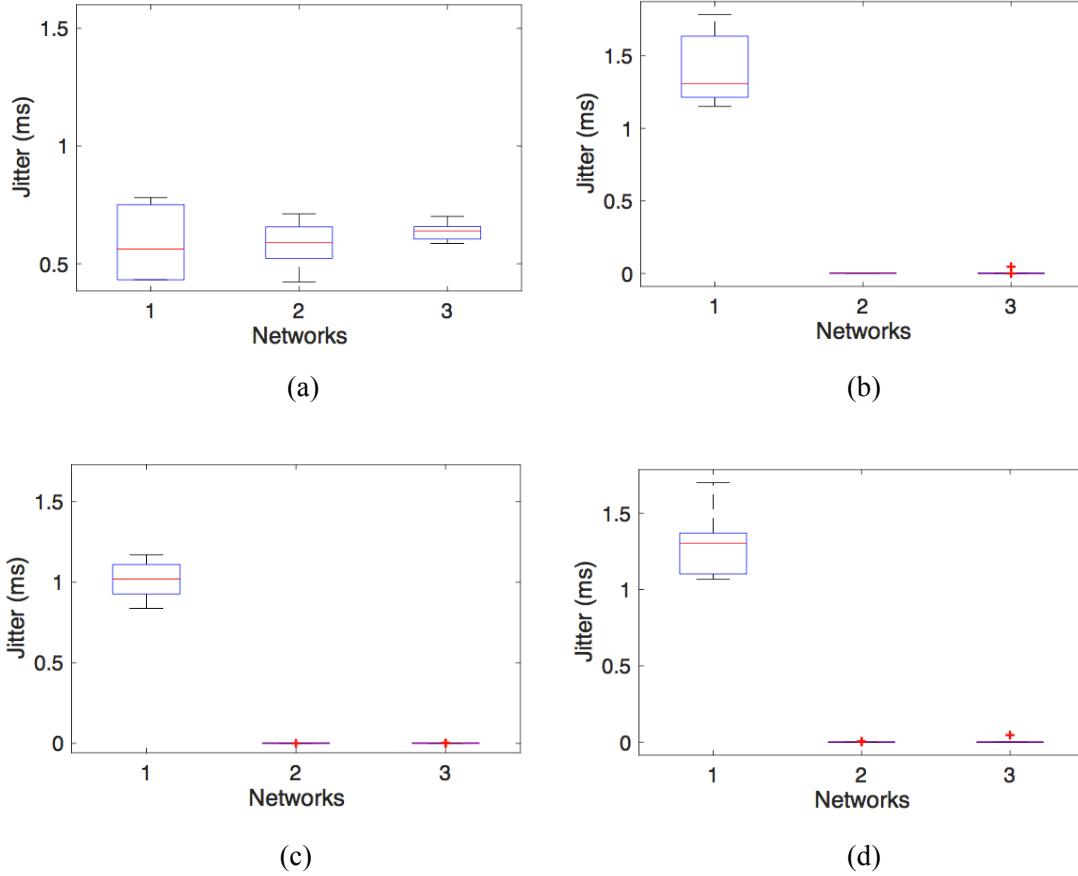


Figura 9. **Jitter**. (a) Escenario medianamente interferido . (b) Escenario completamente interferido, canal 1. (c) Escenario completamente interferido, canal 6. (d) Escenario completamente interferido, canal 11.

5.6.2.4 Paquetes perdidos

En la Figura 10 se muestra el porcentaje de paquetes perdidos en todos los escenarios de prueba. El escenario medianamente interferido, como se muestra en la Figura 10a, presenta un porcentaje de paquetes perdidos del 1.015% en la red 1/canal 1, valor más bajo comparado con las otras redes, las cuales presentan un porcentaje de 1.615% en la red 2/canal 6 y 1.245% en la red 3/canal 11.

En cuanto a los escenarios completamente interferidos, la Figura 10b muestra los porcentajes de paquetes perdidos para el canal 1, en el cual la red 1 tuvo un porcentaje de 4.63%, la red 2 de 0.010% y la red 3 de 18.98%. Para el canal 6, como se muestra en

la Figura 10c, los porcentajes de paquetes perdidos fueron de 1.325% para la red 1, 0.015% para la red 2 y 0.055% para la red 3. Y por último, la Figura 10d muestra el porcentaje de paquetes perdidos para el canal 11, los cuales fueron de 3.99% en la red 1, 0.03% en la red 2 y 0.25% en la red 3. La menor pérdida de paquetes en estos escenarios se tuvo al trabajar con el canal 6, mientras que las redes que presentaron mayores pérdidas, fueron las que trabajaron en el canal 1.

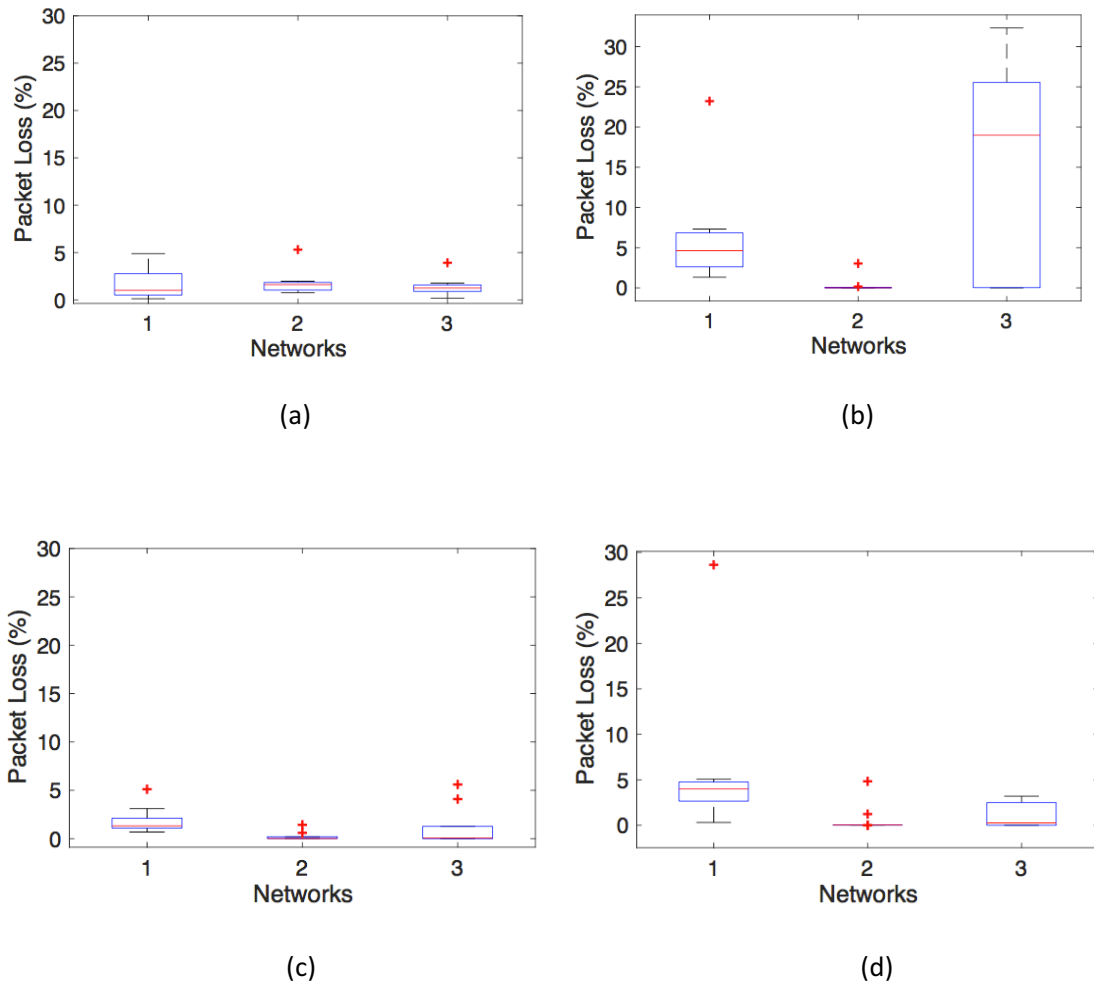


Figura 10. **Paquetes perdidos:** (a) Escenario medianamente interferido. (b) Escenario completamente interferido, canal 1. (c) Escenario completamente interferido, canal 6. (d) Escenario completamente interferido, canal 11.

5.6.3 Análisis y discusión de resultados

En este punto del estudio, se realiza una discusión de los resultados obtenidos en este trabajo y los resultados obtenidos en otros trabajos, que se han referenciado en relación al desempeño del estándar IEEE 802.11n en diferentes escenarios de prueba. Se debe observar, que las pruebas realizadas se hicieron sólo para la frecuencia de 2.4GHz.

Para esta discusión de resultados se ha tomado en cuenta que en cada escenario, mediana y completamente interferido, las métricas de desempeño evaluadas obedecen a la metodología planteada de garantizar un número de paquetes perdidos menores al 3%, aconsejable en aplicaciones en tiempo real (UIT-T, 2001).

Evaluando el desempeño del estándar IEEE 802.11n en función de las mediciones de las diferentes métricas de desempeño y del *throughput* normalizado en un ambiente de laboratorio mediana y completamente interferido, se obtiene que al trabajar con canales independientes, en nuestro caso, el canal 1, canal 6 y canal 11, el estándar tiene un mejor desempeño. Es decir, valores de eficiencia entre el 60% y el 90%, aproximadamente un 35% más que en los escenarios con interferencia co-canal producida entre las tres redes, en los cuales los valores de eficiencia oscilan entre el 25% y el 54%. Estos resultados no se contraponen a los obtenidos en (Lara Cueva et al., 2016), en donde al comparar el estándar IEEE 802.11n con el estándar IEEE 802.11b y WDS, se obtuvo 78% de eficiencia, valor que supera a los resultados de las otras variantes en un escenario sin interferencia, en el que se tiene como obstáculo el primer piso de un edificio entre transmisor y receptor, aproximadamente 3.60 metros y un 80% de eficiencia en un escenario sin obstáculos. A media que aumenta la distancia, estas medidas decrecen, teniendo un mejor desempeño el estándar IEEE 802.11b, de aproximadamente el 17% de eficiencia, comparado con el estándar IEEE 802.11n con un valor de 0.8% a una distancia de 10.8 metros.

Se ha determinado también, que en general, los dispositivos que trabajan bajo el estándar IEEE 802.11n registran un porcentaje bajo de pérdida de paquetes, tanto en escenarios sin interferencia como en escenarios completamente interferidos, es así, que para la mayoría de escenarios los paquetes perdidos no sobrepasan el 3%, excepto en tres de los escenarios con interferencia, en los que se tuvo una pérdida de paquetes del

3.99%, 4.63% y 18.98%, valores que no marcan una diferencia debido a la cantidad de mediciones realizadas con resultados positivos en el resto de escenarios. Los resultados positivos de esta métrica de desempeño en este trabajo, son similares a los encontrados en (Sendra et al., 2011), que a pesar de que sus mediciones son diferentes a este caso de estudio, porque comparan con otras variantes del estándar IEEE 802.11, las observaciones acerca de los paquetes perdidos para el estándar IEEE 802.11n son similares. De igual manera, en (Lara Cueva et al., 2016), en escenarios sin interferencia, se tienen porcentajes bajos de paquetes perdidos en distancias cortas, entre 3.60 metros y 7.2 metros, que representan la diferencia de distancia entre planta baja, primero y segundo piso de un edificio, pero este porcentaje aumenta al incrementar la distancia a 10.8 metros, en la cual se destaca el estándar IEEE 802.11b.

En este trabajo, todos los escenarios de prueba se realizaron en un ambiente de laboratorio en el cual tanto el retardo de propagación, el tiempo de transmisión, que fue aproximadamente de 30 segundos, y el retardo de procesamiento son parámetros con valores insignificantes, ya que se trabajó con redes pequeñas que carecen de un largo número de dispositivos intermediarios, los cuales introducen retardos en los procesamientos. Es así, que los valores de retardo obtenidos en las mediciones son relativamente bajos en todos los escenarios, los cuales oscilan entre 27.99ms y 35.14ms en el escenario medianamente interferido y entre 0.005ms y 44.44ms en los escenarios con interferencia co-canal. Además, estos valores se encuentran dentro del límite internacional permitido de 120ms para aplicaciones en tiempo real («Reglamento de prestación y calidad de los servicios», s. f.)

En concordancia con los resultados obtenidos de retardo, se tiene valores de *jitter* pequeños, los cuales oscilan entre 0.562ms y 0.639ms en el escenario medianamente interferido y entre 0.0009ms y 1.308ms en los escenarios completamente interferidos, ya que no se tuvieron tiempos largos de espera de conexión, ni congestión de tráfico durante las mediciones, por tratarse de un ambiente interno de laboratorio. Sí se tuvo la presencia de interferencias externas e interferencias co-canal en el caso de los escenarios completamente interferidos, sin embargo ninguno de los valores obtenidos sobrepasa el límite permitido internacionalmente para aplicaciones en tiempo real de 30ms («Reglamento de prestación y calidad de los servicios», s. f.).

5.6.4 Análisis propuesta de mejora

Al término del análisis y discusión técnica de resultados, se sugiere lo siguiente:

- El estándar IEEE 802.11n presenta una gran ventaja sobre el resto de variantes, ya que al tener tasas de transmisión más altas, las cuales decrecen al aumentar la distancia, aún siguen siendo mayores a las tasas de transmisión reales presentadas por otras variantes del estándar IEEE 802.11. Sin embargo, y de acuerdo a (Lara Cueva et al., 2016) cuando se tiene obstáculos de por medio, la eficiencia del estándar puede decaer, por tanto, no sería adecuado aún desligar por completo los estándares IEEE 802.11b/g de la red inalámbrica actual. Las tasas de transmisión del estándar IEEE 802.11n varían de acuerdo a la codificación y modulación empleadas, y por ello, los equipos correspondientes tienen la ventaja de disponer de la funcionalidad de codificación y modulación adaptativa, acoplándose a las diferentes tasas de transmisión permitidas.
- Una propuesta de alternativa de mejora a la red inalámbrica instalada en el campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en relación al uso del estándar IEEE 802.11n como parte del estándar actual, es decir, intercambiar no sólo entre los estándares IEEE 802.11b/g, sino también entre los estándares IEEE 802.11b/g/n, debido a las múltiples ventajas que presenta la variante n. Así, la tasa de transmisión no estará limitada a 11Mbps y 54Mbps sino también hasta 130Mbps, valor que está dentro del rango de tasas de transmisión obligatorias por el estándar IEEE 802.11n para los productos comerciales actuales.

5.6.5 Análisis técnico de Factibilidad

Finalmente, se realiza un análisis netamente técnico, de la factibilidad de instalar el estándar IEEE 802.11n en el campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Físicamente hablando, la infraestructura actual permitiría implementar el estándar IEEE 802.11n únicamente con el cambio de ruteadores inalámbricos que realicen la conmutación no solo entre los estándares IEEE 802.11b/g, sino también entre los estándares IEEE 802.11b/g/n, mencionado en el apartado de propuesta de mejora.

Como cualquier procedimiento a realizar antes de adquirir un dispositivo, se deberá primeramente revisar la información técnica del fabricante del equipo, para determinar las posibilidades de operación. En lo que respecta a marca, se podría sugerir a Cisco, por su gran aceptación en el mercado de las redes de comunicaciones.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de los dispositivos que brindarían un buen desempeño de la red. Los equipos recomendados se han tomado en base al router usado en las mediciones de este caso de estudio, el cual corresponde al modelo Linksys E4200, cuyas características se especifican en la Tabla 6 de la metodología de este trabajo.

Tabla 16.
Características principales de APs marca CISCO (Referencia propia)

Parámetros	E4200	E4200v2	E4500
Protocolo 802.11n	√	√	√
Compatible con IEEE 802.11b/g/n	√	√	√
Frecuencias de operación	2.4GHz /5GHz	2.4GHz /5GHz	2.4GHz /5GHz
Velocidad Máxima (Mbps)	300 + 450	450 +450	450 +450
MIMO (2.4GHZ/5GHZ)	2T3R / 3T3R	3T3R / 3T3R	3T3R / 3T3R
Ancho de canal	20MHz/40MHz	20MHz/40MHz	20MHz/40MHz
Puertos LAN	4	4	4
Puertos WAN	1	1	1
Velocidad Ethernet (Mbps)	10/100/1000	10/100/1000	10/100/1000

Seguridad WEP/WPA2	√	√	√
Firewall SPI	√	√	√
NAT			√
Sistema Operativo	Windows/Mac	Windows	Windows
Memoria RAM	64 Mb	128 Mb	128 Mb
Puerto USB 2.0	√	√	√
Administración de tráfico QoS	√	√	√
IP automática	√	√	
Número de hosts	10	50	50

Sin embargo, la factibilidad de implementar el estándar IEEE 802.11n en el campus universitario, depende de los siguientes aspectos, a ser tomados en cuenta:

- La mejora del rendimiento de la red inalámbrica sólo es posible cuando los dispositivos cliente y red sean IEEE 802.11n, por tanto, no se puede migrar completamente al estándar, debido a la cantidad de dispositivos clientes, que todavía no tienen incorporado en su hardware esta tecnología. Además, con la infraestructura actual del campus universitario, la migración completa no será efectiva, debido al corto alcance que se tiene al trabajar con la frecuencia de 5GHz. Sin embargo, esto sería factible con un rediseño de la infraestructura de red, en el que se prevea un aumento en la cantidad de APs y un correcto posicionamiento de los mismos mediante mediciones previas de la potencia de la señal emitida por los equipos a través de la superficie del campus, para evitar el problema de interferencias causadas por emisiones altas de potencia por parte de los APs que se encuentran muy cercanos.
- Se requiere, una correcta planificación de la infraestructura de red, con una adecuada canalización frecuencial, mediante el uso de canales independientes, como en nuestro caso, los canales ortogonales 1, 6 y 11, que generalmente son los más usados en la frecuencia de 2.4GHz. Sin embargo, el uso de estos canales no asegura la eliminación completa de interferencias, ya que en la práctica, y

como se menciona en (Fuxjäger, Valerio, & Ricciato, 2007), la interferencia por canales adyacentes puede presentarse también en canales independientes debido a la proximidad entre transmisor y receptor, fenómeno físico conocido como “*near-far effect*” en comunicaciones inalámbricas. Por lo que se recomienda tomar en cuenta la referencia mencionada al momento de la planificación.

- Otro factor importante a ser analizado, en cuanto a cobertura, es la dirección de radiación de las antenas ubicadas tanto externa como internamente, dependiendo del tipo de AP que se vaya a utilizar, lo cual incide en el aumento o disminución del nivel de la señal, tal como se menciona en (Sendra et al., 2011). Por lo que un previo análisis del direccionamiento de las antenas de los dispositivos, también asegura un mejor desempeño del estándar, y por tanto un mejor desempeño de la red.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En este caso de estudio, se determinaron las principales características del estándar IEEE 802.11n. Tecnología MIMO, modulación OFDM, tasa teórica de 600Mbps a un ancho de canal de 40MHz, tasa teórica de 300Mbps a un ancho de canal de 20MHz, tasas comerciales obligatorias de 6.5Mbps, 13Mbps, 26Mbps, 52Mbps, 65Mbps, 117Mbps y 130Mbps, doble banda de operación de 2.4GHz y 5GHz, optimización de carga útil, entre otras relevancias del estándar, que permiten teóricamente, mejorar significativamente el rendimiento de una red inalámbrica.
- Se evaluó en forma práctica, el desempeño del estándar IEEE 802.11n mediante la medición de los parámetros de *throughput* normalizado, retardo, *jitter* y paquetes perdidos en un ambiente de laboratorio, en escenarios de prueba mediana y completamente interferidos, obteniéndose que el estándar reduce su rendimiento en aproximadamente un 35%, en escenarios con interferencia co-canal. Esto corrobora la hipótesis de que al aumentar la separación entre canales, es decir, con el uso de canales independientes, el registro de pérdidas es menor. Sin embargo, no se sobrepasaron los límites teóricos permitidos internacionalmente para los parámetros medidos en ninguno de los escenarios.
- De la toma de mediciones se obtuvieron valores fuera de rango, que a pesar de no marcar una diferencia en el análisis de resultados, debido a que la cantidad de mediciones exitosas es mayor, son valores que pudieron haberse producido debido a la presencia de otros dispositivos inalámbricos, redes inalámbricas trabajando bajo el estándar IEEE 802.11 dentro del campus, tipo de hardware usado, etc., factores que pueden producir un aumento en las interferencias. También al hecho de que, al tomar las mediciones en un sitio cerrado, las reflexiones pueden afectar a la potencia de la señal recibida, a pesar de que en el

estándar 802.11n, MIMO aprovecha este fenómeno físico para incrementar la velocidad de transmisión reduciendo el rango de error.

- En este trabajo se obtienen porcentajes de pérdida de paquetes relativamente bajos, que no sobrepasaron el límite permitido internacionalmente, en ninguno de los escenarios, ya que se limitó la tasa de transmisión en cada uno de ellos. Comparando estos resultados con otras investigaciones vemos que las conclusiones coinciden y que el estándar IEEE 802.11n presenta ventajas sobre otras variantes del estándar. Esto se debe principalmente a que el estándar usa MIMO, una de sus características principales, en donde tanto transmisor como receptor tiene múltiples antenas reduciendo las interferencias que afectan a las redes inalámbricas tradicionales, como es el caso del fenómeno de reflexión.
- Se recomienda para un trabajo futuro realizar pruebas con la frecuencia de 5GHz, las cuales no se hicieron dentro de este caso de estudio por tratarse de un trabajo concreto y puntual. También se sugiere, debido a la misma razón, realizar mediciones reales de la red inalámbrica actual instalada en el campus universitario antes de realizar una nueva planificación de infraestructura de red con el estándar IEEE 802.11n.
- Para determinar las tasas de transmisión reales del estándar IEEE 802.11n, se sugiere realizar nuevas mediciones en una cámara anecoica, la misma que permite aislar todo tipo de interferencias externas que podrían afectar los resultados esperados.
- En este trabajo se evaluó y comparó el desempeño del estándar IEEE 802.11n entre los escenarios de prueba, mediana y completamente interferidos, limitando la tasa de transmisión en cada uno de ellos. Se sugiere un trabajo futuro para poder observar las respuestas de las métricas de desempeño correspondientes a retardo, *jitter* y paquetes perdidos, y compararlas entre los diferentes escenarios

de prueba, en los cuales se trabaje con la misma tasa de transmisión en todos los casos.

- Finalmente, se podrían realizar mediciones en las que intervengan dispositivos intermediarios en cada una de las redes, con el fin de introducir retardos en los procesamientos y evaluar el desempeño estándar IEEE 802.11n en otros escenarios de prueba.

Bibliografía

- Bernal, I. (2005). Comunicaciones Inalámbricas. Quito.
- Chafla, J. F. (2014). Calidad de Servicio (QoS) en Redes TCP/IP. Presentado en Maestría en Redes de Comunicaciones. PUCE, PUCE.
- Cuesta Palacios, V. del P., & Romero Leon, C. A. (2013, febrero). Evaluación de tecnología 802.11n en redes de larga distancia. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja-Ecuador.
- Davies, J. N., Grout, V., & Picking, R. (2008). Prediction of Wireless Network Signal Strength within a Building.
- De Nova Segundo, J. (s. f.). NTP. Recuperado a partir de <https://jorgedenovasri.files.wordpress.com/2013/02/ntp.pdf>
- Escudero Pascual, A. (2007). Unidad 02: Estándares en Tecnologías Inalámbricas.
- Facchini, I. A. (2010, julio). Rendimiento del estándar 802.11n – Estrategias de Migración (Doctoral Dissertation).
- Foschini, G. ., & Gans, M. J. (1998). On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas. Wireless personal Communications, 6(3).
- Fuxjäger, P., Valerio, D., & Ricciato, F. (2007). The Myth of Non-Overlapping Channels: Interference Measurements in IEEE 802.11. Fourth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services. IEEE, 1-8.
- García Fernández, N. (2006). Modelo de cobertura en redes inalámbricas basado en radiosidad por refinamiento progresivo (Tesis Doctoral). Universidad de Oviedo, Oviedo.
- Garcia, M., Tomas, J., Boronat, F., & LLoret, J. (2009). The Development of Two Systems for Indoor Wireless Sensors Self-location. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, Vol. 8(3-4), 1-24.
- Gil Sanchez, C. G., & Franco Lemus, M. G. (2005). Análisis estadístico en Matlab.
- Guevara, R. C., & Serna, É. M. (2013, diciembre). Una propuesta de solución al problema de la interferencia entre redes wifi por solapamiento de canales.
- Hernández, A., Magaña, E., Izal, M., & Morató, D. (2007, octubre). Detección de congestión en la Internet europea, Vol. 5(6).
- Kurose, J. F., & Ross, K. W. (s. f.). Redes de Computadores: Un enfoque descendente basado en internet (2004.^a ed.). Pearson Addison Wesley.

La tasa de transferencia de 802.11n. (2009, enero 26). Recuperado a partir de <http://librosnetworking.blogspot.com/2009/01/la-tasa-de-transferencia-de-80211n.html>

Lara Cueva, R. A., Fernández Jimenez, C. B., & Morales Maldonado, C. A. (2016). Análisis del desempeño en un enlace descendente de redes basadas en los estándares IEEE 802.11b, IEEE 802.11n y WDS, 5(10).

Linksys. (s. f.). Recuperado a partir de <http://www.linksys.com/es/support-article?articleNum=134478>

LLoret, J., Lopez, J. J., & Ramos, G. (2003). Wireless LAN Deployment in Large Extension Areas: The Case of a University Campus. *Communication Systems and Networks*, 8-10.

Mengual, E., Garcia Villegas, E., & Vidal, R. (2013). Uso de canales solapados en una red de área de campus inalámbrica con IEEE 802.11. *XI Jornadas de Ingeniería Telemática*.

Mills, D. L. (1985). Network time protocol (NTP) (RFC958) (p. 14). Network Working Group.

Peñaranda Rangel, A. A., & Castellanos Leon, J. A. (2016). Estudio para determinar el canal con mayor y menor interferencia en las redes wi-fi en los barrios, Las Llanadas, El Retiro, El Tope y Caracoli de la ciudad de Ocaña (Doctoral Dissertation).

Ramón Ramírez, L. (2015). *Sistemas de radiocomunicaciones* (2005.^a ed.). Ediciones Paraninfo, S.A.

Reglamento de prestación y calidad de los servicios. (s. f.). Recuperado a partir de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjH-ISFwvPPAhVCNSYKHTY-DEoQFggcMAA&url=http%3A%2F%2Fregulatel.osiptel.gob.pe%2Fwp-content%2Fuploads%2F2014%2F09%2FCosta-Rica-Marco-Jur%25C3%25ADdico-tema1.1.pdf&usq=AFQjCNHy7hzPDuxuyDcLN3VwTpmTF4phNg>

Render, B., Stair, M. R., & Hanna, M. E. (2006). *Métodos cuantitativos para los negocios*. México: Pearson Educación.

Rodríguez Mata, E. (2015). Evaluación de herramientas para escenarios de generación de tráfico (Master Universitario en Ingeniería de Redes y Servicios Telemáticos). Universidad Politécnica de Madrid.

Saldaña Medina, J. M. (2011). Técnicas de optimización de parámetros de red para la mejora de la comunicación en servicios de tiempo real (Tesis Doctoral). Universidad de Zaragoza, España.

Sallent Roig, O., Valenzuela González, J. L., & Agustí Comes, R. (s. f.). *Principios de comunicaciones móviles* (PRIMERA 2003). Barcelona - España: Edicions UPC.

Scricca Yanes, L. A. (2013). Comunicaciones móviles en entornos complejos: Planificación de redes LTE. Universidad Politécnica de Madrid.

Sendra, S., Fernandez, P., Turro, C., & LLoret, J. (2010). IEEE 802.11a/b/g/n Indoor Coverage and Performance Comparison. Wireless and Mobile Communications.

Sendra, S., Garcia, M., Turro, C., & LLoret, J. (2011). WLAN IEEE 802.11a/b/g/n Indoor Coverage and Interference Performance Study. International Journal on Advances in Networks and Services, 4(1).

Sendra, S., LLoret, J., Turro, C., & Aguiar, J. M. (2014). IEEE 802.11a/b/g/n short-scale indoor wireless sensor placement. International Journal on Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 15.

UIT-T. (2001). Categorías de calidad de servicio para los usuarios de extremo de servicios multimedios (G.1010) (p. 10).

(s. f.). Recuperado a partir de
http://departamento.pucp.edu.pe/ingenieria/images/Telecomunicaciones/ing_com_inalam/modulo2/WIFI_802.11N_WIMAX_2013x4.pdf

Anexos:

Resultados del software D-ITG de todos los escenarios de prueba

Anexo 1.

Resultados D-ITG: Escenario medianamente interferido, Canal 1 / Red 1

Inyección de Tráfico	Average delay [ms]	Average jitter [ms]	Average bitrate [Mbps]	Packets dropped [%]
#1	12,523	0,432	8,450	4,890
#2	14,224	0,432	8,192	3,010
#3	14,510	0,781	7,923	1,110
#4	30,412	0,432	7,840	1,580
#5	26,509	0,751	6,942	2,760
#6	32,675	0,751	7,950	0,120
#7	15,773	0,562	7,102	0,510
#8	30,531	0,562	7,780	0,920
#9	29,489	0,648	7,750	0,810
#10	36,711	0,562	6,500	0,340

Anexo 2.

Resultados D-ITG: Escenario medianamente interferido, Canal 6 / Red 2

Inyección de Tráfico	Average delay [ms]	Average jitter [ms]	Average bitrate [Mbps]	Packets dropped [%]
#1	20,420	0,423	11,470	5,310
#2	35,012	0,523	10,342	1,960
#3	60,220	0,596	9,874	1,750
#4	53,950	0,712	9,365	1,540
#5	32,534	0,583	9,674	1,690
#6	40,390	0,623	10,235	1,840
#7	35,268	0,498	9,562	0,750
#8	40,262	0,706	9,642	0,860
#9	28,285	0,657	10,192	1,100
#10	33,523	0,564	9,732	1,030

Anexo 3.

Resultados D-ITG: Escenario medianamente interferido, Canal 11 / Red 3

Inyección de Tráfico	Average delay [ms]	Average jitter [ms]	Average bitrate [Mbps]	Packets dropped [%]
#1	9,600	0,632	11,745	3,920
#2	19,856	0,586	12,163	0,230
#3	20,768	0,586	12,240	0,190
#4	51,054	0,695	11,073	1,760
#5	24,073	0,613	12,062	0,900
#6	47,230	0,647	11,743	1,540
#7	22,674	0,605	11,983	1,060
#8	52,286	0,658	11,753	1,570
#9	42,363	0,648	11,232	1,220
#10	36,146	0,701	10,955	1,270

Anexo 4.

Resultados D-ITG: Escenario completamente interferido, Canal 1 / Red 1

Inyección de Tráfico	Average delay [ms]	Average jitter [ms]	Average bitrate [Mbps]	Packets dropped [%]
#1	38,790	1,214	6,689	2,610
#2	39,132	1,151	6,997	1,320
#3	32,853	1,317	6,711	6,840
#4	35,479	1,288	6,737	4,120
#5	49,760	1,300	6,555	5,890
#6	62,015	1,712	5,042	23,22
#7	27,771	1,157	7,017	2,090
#8	71,073	1,635	5,561	2,820
#9	72,647	1,784	5,227	7,320
#10	52,370	1,326	6,757	5,140

Anexo 5.

Resultados D-ITG: Escenario completamente interferido, Canal 1 / Red 2

Inyección de Tráfico	Average delay [ms]	Average jitter [ms]	Average bitrate [Mbps]	Packets dropped [%]
#1	64	0,0013	3,8076	0,01
#2	12,1	0,0022	2,77553	0,01
#3	59	0,0013	3,9232	0,0
#4	20,5	0,0036	1,81667	3,03
#5	77	0,0015	3,47993	0,01
#6	21,7	0,0038	1,7433	0,16
#7	52	0,0013	3,80369	0,01
#8	18	0,003	2,07142	0,04
#9	19	0,001	4,59539	0,0
#10	88	0,0017	3,23649	0,0

Anexo 6.

Resultados D-ITG: Escenario completamente interferido, Canal 1 / Red 3

Inyección de Tráfico	Average delay [ms]	Average jitter [ms]	Average bitrate [Mbps]	Packets dropped [%]
#1	45,3	0,046763	0,087	24,24
#2	60,2	0,0	6,348	0,03
#3	36,3	0,000726	6,711	0,0
#4	50,2	0,000827	4,317	32,32
#5	40,7	0,001319	4,566	26,11
#6	60,2	0,000852	6,437	0,09
#7	30,1	0,000943	4,683	25,54
#8	40,2	0,001266	4,708	24,94
#9	23,2	0,000972	5,983	0,0
#10	41,1	0,001488	4,054	13,72

Anexo 7.

Resultados D-ITG: Escenario completamente interferido, Canal 6 / Red 1

Inyección de Tráfico	Average delay [ms]	Average jitter [ms]	Average bitrate [Mbps]	Packets dropped [%]
#1	8,357	0,838	5,693	0,690
#2	35,087	1,012	5,561	0,690
#3	38,865	0,900	5,661	1,230
#4	42,950	1,170	5,545	3,100
#5	35,556	1,110	5,607	2,120
#6	16,034	1,028	5,661	1,260
#7	17,678	0,927	5,560	1,460
#8	53,960	1,170	5,441	5,110
#9	29,537	1,098	5,672	1,090
#10	23,804	0,982	5,651	1,390

Anexo 8.

Resultados D-ITG: Escenario completamente interferido, Canal 6 / Red 2

Inyección de Tráfico	Average delay [ms]	Average jitter [ms]	Average bitrate [Mbps]	Packets dropped [%]
#1	18,8	0,001	4,46864	0,6
#2	19,15	0,0009	4,97862	0,2
#3	19,71	0,0006	5,60696	0,01
#4	19,33	0,00079	5,15948	0,02
#5	19,35	0,00086	5,13187	0,01
#6	19,23	0,000911	5,06399	0,02
#7	19,1	0,00093	5,03052	0,01
#8	18,99	0,00011	4,43099	0,01
#9	19,28	0,00094	4,70495	1,43
#10	18,81	0,0011	4,22275	0,01

Anexo 9.

Resultados D-ITG: Escenario completamente interferido, Canal 6 / Red 3

Inyección de Tráfico	Average delay [ms]	Average jitter [ms]	Average bitrate [Mbps]	Packets dropped [%]
#1	33,5	0,000996	7,34782785	0,06
#2	36,2	0,000934	7,72810262	0,02
#3	36,1	0,001006	7,14302966	4,09
#4	29,8	0,001043	6,7966058	5,6
#5	11,2	0,000901	7,40763088	0,0
#6	29,2	0,000897	7,57950269	0,0
#7	10,8	0,001018	7,05104005	0,05
#8	11,7	0,001341	5,66229968	0,16
#9	19,2	0,00108	6,7382887	1,27
#10	23,2	0,001361	5,50055818	0,0

Anexo 10.

Resultados D-ITG: Escenario completamente interferido, Canal 11 / Red 1

Inyección de Tráfico	Average delay [ms]	Average jitter [ms]	Average bitrate [Mbps]	Packets dropped [%]
#1	19,400	1,370	5,579	2,660
#2	25,380	1,330	5,443	5,060
#3	30,560	1,700	4,190	4,710
#4	17,523	1,074	5,648	1,310
#5	17,918	1,067	5,743	0,310
#6	49,643	1,277	5,159	4,760
#7	55,212	1,244	4,084	28,640
#8	30,509	1,360	5,025	4,060
#9	42,938	1,102	5,570	2,790
#10	30,189	1,522	5,029	3,920

Anexo 11.

Resultados D-ITG: Escenario completamente interferido, Canal 11 / Red 2

Inyección de Tráfico	Average delay [ms]	Average jitter [ms]	Average bitrate [Mbps]	Packets dropped [%]
#1	19,5	0,00078	5,41735	1,23
#2	19	0,00108	4,83528	0,03
#3	19,33	0,000842	5,41209	0,0
#4	16,13	0,0053	1,3378	4,83
#5	18,8	0,0016	3,37979	0,02
#6	19,19	0,00096	5,04729	0,03
#7	17,63	0,00308	2,13108	0,0
#8	19,6	0,00071	5,73782	0,02
#9	19,6	0,00062	6,04778	0,03
#10	18,81	0,0013	3,87943	0,03

Anexo 12.

Resultados D-ITG: Escenario completamente interferido, Canal 11 / Red 3

Inyección de Tráfico	Average delay [ms]	Average jitter [ms]	Average bitrate [Mbps]	Packets dropped [%]
#1	0,009	0,046763	6,710804452	0,24
#2	0,006	0,001319	6,348491846	0,00
#3	0,161453	0,000726	6,710804452	0,00
#4	0,005	0,000827	4,316901679	3,2
#5	0,004	0,001319	4,566096421	0,26
#6	0,007	0,000852	6,437311301	0,09
#7	0,003	0,000943	4,682899633	2,50
#8	0,004	0,001266	4,707662869	2,49
#9	0,006	0,000972	5,98264162	0,00
#10	0,004	0,001488	4,053953258	1,37